

비탄성 설계스펙트럼에 대한 이력거동 특성의 영향

Effect of Hysteretic Characteristics on Inelastic Seismic Design Spectra

오 영 훈* 한 상 환** 이 리 형***
Oh, Young-hun Han, Sang-whan Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

Current seismic design code is based on the assumption that the designed structures would be behaved inelastically during a severe earthquake ground motion. For this reason, seismic design forces calculated by seismic codes are much lower than the forces generated by design earthquakes which makes structures responding elastically. Present procedures for calculating seismic design forces are based on the use of elastic spectra reduced by a strength reduction factors known as "response modification factor".

The effect of hysteretic behavior, as well as maximum ductility ratio and period on the inelastic strength demand is investigated. Special emphasis is given to the effects of the hysteretic characteristics such as strength degradation or pinching. Results indicate that inelastic strength demands are strongly dependent on level of inelastic deformation, period and hysteretic behavior.

1. 서 론

내진설계 규준에 제시되어 있는 설계강도는 큰 지진이 발생했을 때 탄성범위내에서 구조물이 거동하는데 필요한 강도 보다 상당히 작은 값으로 설정되어 있다. 즉, 구조물의 내진설계에 사용되는 수평강도(lateral strength)는 탄성 요구강도(elastic strength demand)를 강도저감계수(반응수정계수)로 나누어준 설계수평강도(lateral design strength, 밀면전단력)를 사용하고 있다. 내진설계 규준에서 사용하는 강도저감계수는 구조물의 감쇠(damping), 부가강도(overstrength) 및 에너지 소산능력(energy dissipation capacity)을 동시에 고려한 것으로서, 과거 강진 발생시 관찰된 구조물들의 거동 및 피해상황을 종합하여 설정된 수치들이다. 하지만, 현행 내진설계규정에 제시된 강도저감계수는 합리성과 객관성이 결여되어 있다고 지적받고 있다. 더욱이, 목표 연성비로 피해를 제한하기 위한 비탄성 설계스펙트럼의 적절한 평가는 현행 내진설계 규준의 신뢰성을 향상시키기 위하여 모색되어야 할 하나의 방법으로 주목되고 있다.

강진의 작용할 경우 대부분의 구조물은 상당한 정도의 비탄성 이력거동을 경험하게 된다. 이 경우 비탄성 이력거동에 의한 에너지소산능력은 설계수평강도를 저감할 수 있는 한가지 근거가 되

* 한양대 건축공학과 대학원 박사과정
** 한양대 건축공학부 전임강사
*** 한양대 건축공학부 교수

고 있으며, 적절한 수준으로 비탄성 변형(피해)을 제어할 수 있도록 최소 비탄성 요구강도를 산정해야 할 것이다. 지난 30여년 동안 일부 연구자들에 의해서 비탄성 요구강도에 관한 연구가 진행되어 왔지만, 현재까지 내진설계 기준에 반영될 정도로 충분한 결과를 얻어내고 있지 못한 상황이다. 이에 본 연구에서 목표로 하는 사항들은 다음과 같다.

- (1) 목표 변위연성비를 유지하기 위하여 필요한 최소 수평강도를 결정할 수 있도록 목표연성비, 고유주기 및 지반조건과 관련지어 비탄성 요구강도를 산정한다.
- (2) 비탄성 요구강도를 산정하는데 있어서 구조물 이력거동 특성의 영향을 평가한다.

2. 기존 연구의 고찰

비탄성 요구강도 스펙트럼은 구조물의 동적특성(고유주기, 감쇠 및 이력거동 등)과 지반운동에 따라 복합적으로 결정되는 함수이다. 이러한 제반 변수들이 비탄성 요구강도에 미치는 영향을 규명하기 위한 기존 연구들은 다음과 같다.

1) Riddell & Newmark의 연구(1979)

2, 5, 10%의 감쇠를 갖는 탄소성(elasto-plastic) 시스템과 5%의 감쇠를 갖는 이선형(bilinear) 및 강성저하(stiffness degrading) 시스템에 대하여 변위연성비를 1에서부터 10까지 다르게 하면서 비탄성 응답스펙트럼을 산정하였다. 이 연구는 관측된 지진기록을 사용하여 비탄성 응답스펙트럼을 구하고, 이에 대한 통계학적 해석을 처음으로 수행한 것으로서 암반(rock)과 충적토(alluvium) 지반에서 관측된 10개의 지진기록을 사용하였다. 이 연구결과에 의하면 탄소성, 이선형 및 강성저하 시스템의 최대응답이 매우 유사하게 나타나고 있으며, 탄소성 응답스펙트럼을 사용하는 것이 일반적으로 안전측의 결과를 가져올 수 있다고 결론내리고 있다.

2) Nassar & Krawinkler 의 연구(1991)

이 연구는 미국 서부지역에서 기록된 15개의 지진기록을 사용하여 단자유도 이선형(bilinear) 구조물들의 응답을 평가하였다. 고유주기, 항복강도, 변형경화비 및 비탄성 이력거동과 같은 변수들 뿐만 아니라 진원거리에 따른 평균 비탄성 요구강도가 조사되었다. 이 연구에 의하면 진원거리와 강성저하형 이력거동(수정 Clough 모델)은 비탄성 요구강도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

3) Vidic, Fajfar & Fischinger 의 연구(1992)

미국 서부지역과 1979년 유고 Montenegro 지진에서 기록된 20개의 지진기록을 사용하여 평균 비탄성 요구강도를 산정하였다. 구조물의 이력거동은 이선형(bilinear), 강성저하형(Q-model) 모델을 사용하였으며, 감쇠특성은 구조물의 강성과 질량에 비례하는 점성감쇠(viscous damping)를 고려하였다. 비탄성 요구강도는 2개의 주기영역으로 구분되어 산정되었으며, 짧은 주기영역에서는 변위연성비에 따라 선형적으로 반비례하는 것으로 나타났다.

3. 응답스펙트럼의 산정에 사용된 지진기록

본 연구에서는 북미와 남미에서 기록된 총 12개의 지진파를 사용하였으며, 이들 지진기록에 대한 설명은 표1에 나타나 있다. 이 기록들을 지반계수 별로 본다면 S1에서 기록된 것이 3개, S2와 S3에서 기록된 것이 4개, S4에서 기록된 것이 5개이다. 일반적으로 각각의 지반특성을 적절히 반영하면서 아울러 응답스펙트럼에 맞는 지진기록을 찾거나 만들기는 매우 어려운 일이다.

표1. 사용된 지진기록

No.	Event Name	Station Name	Date	M	PGA (cm/sec^2)	Soil Type
1	Offshore Eureka	Cape Mendocino	1994. 9. 1	7.2	23.255	S ₁
2	Western Washington	Olympia Hwy Test Lab	1949. 4.13	7.1	-177.8	S ₁
3	Whittier	Pacoima - Kagel Canyon	1987.10. 1	6.1	154.853	S ₁
4	Santa Cruz MTNS (Loma Prieta)	Berkeley - Lawrence Berkeley Lab	1989.10.17	7.1	-114.412	S ₂ , S ₃
5	Alaska	PRS Pirate Shake	1983. 2.14	6.3	11.4	S ₂ , S ₃
6	Alaska	ANH Anchorage Native Med Cntr	1975. 1. 1	6.0	-70.4	S ₂ , S ₃
7	Northridge	Alhambra - Fremont School	1994. 2.17	6.7	-99.074	S ₂ , S ₃
8	El Alamo as	El Centro - Imp Val Irr Dist	1956. 2. 9	4.5	11.8	S ₄
9	Michoacan, Mexico	Cayaco	1985. 9.19	8.1	49.8	S ₄
10	Morgan Hill	Gilroy Array Sta #3	1984. 4.24	6.2	199.5	S ₄
11	Mexico City	SEC. of Communication and Transportation	1985. 9	8.1	167.92	S ₄
12	Santa Cruz MTNS (Loma Prieta)	Foster City - Redwood Shores	1989.10.17	7.1	277.607	S ₄

한편, 지진의 크기를 조정하는 방법은 최대 지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)의 크기를 조정하는 방법, 최대 지반속도(Peak Ground Velocity, PGV)의 크기를 조정하는 방법, 지진 에너지를 조정하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 여러 지진기록들을 PGA가 국내 내진설계기준에서 사용하고 있는 0.12g(구역2)에 맞도록 조정하여 응답스펙트럼을 그려 기준의 것과 유사한 것만을 채택하였다. 이렇게 채택된 것이 11개이고 지반 S₄에서 5개의 지진중 Mexico 지진은 매우 특이한 성질을 가진 지진이어서 포함시켰다. 그림1에서는 멕시코 지진을 포함한 12개의 지진기록의 PGA가 0.12g로 조정하여 각각의 지반조건에 따라 구한 탄성 응답스펙트럼(평균 및 평균+표준편차) 값과 미국의 NEHRP 내진기준(1994)의 값을 비교하여 보여주고 있다. 이 기준에서 제안하고 있는 응답스펙트럼의 산정식은 아래와 같다. 기준식에서는 식(1)에서 T대신 T^{2/3}를 사용하고 있다. 이는 다자유도 구조물에서 고차모드의 영향을 반영하기 위한 것인데, 본 연구에서는 단자유도계를 대상으로 응답스펙트럼을 비교하므로 T를 사용한다.

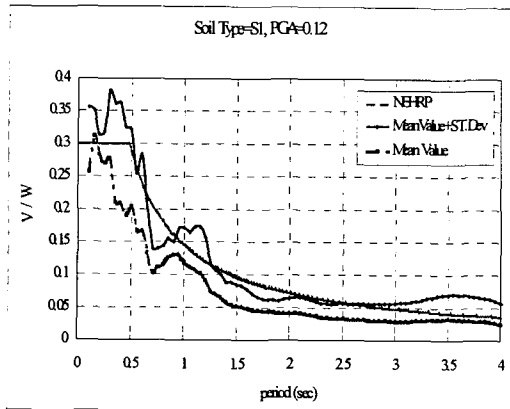
$$S_a = \frac{1.2 A_v S}{T} < 2.5 A_a \quad (1)$$

4. 비탄성 요구강도 스펙트럼 (inelastic strength demand spectrum)

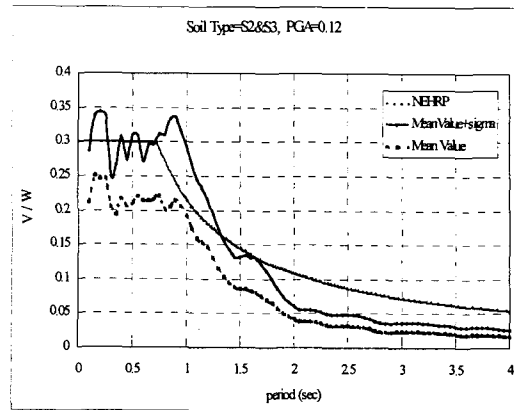
구조물은 요구되는 변위연성비(displacement ductility ratio) 보다 더 큰 국부(임의의 층 또는 부재) 연성능력을 갖도록 설계되었을 때 적합하게 설계된 것이라고 할 수 있다. 그러므로, 구조물의 예비설계 단계에서는 과도한 국부적 연성요구가 발생하지 않도록 구조물 전체(구조물)의 변위연성능력을 미리 설정된 수준으로 제한하기 위하여 구조물의 수평강도에 대한 평가가 필요하다.

지진작용시 구조물이 경험하는 비탄성 변형의 수준은 항복변위에 대한 상대변위 절대치의 비로 정의되는 변위연성비 μ 로서 구할 수 있으며, 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

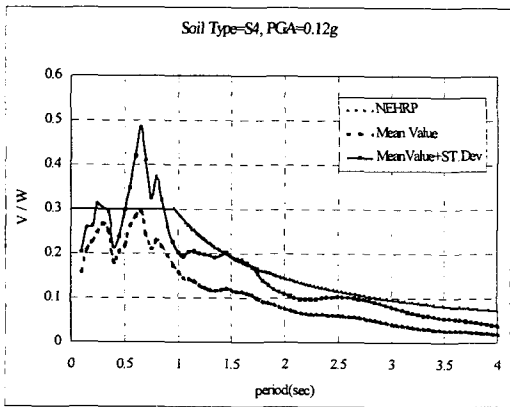
$$\mu = \frac{\max. |u(t)|}{u_y} \quad (2)$$



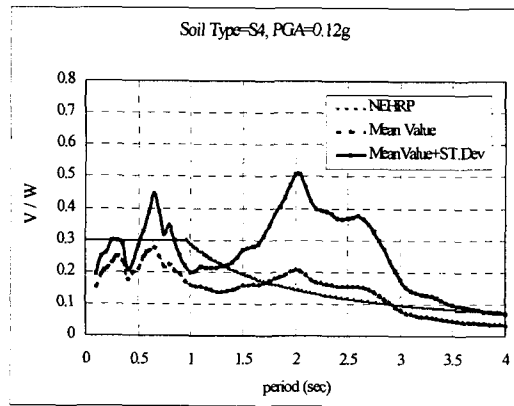
(a) S1 지반



(b) S2, S3 지반



(c) S4 지반(1985 멕시코지진 제외)



(d) S4 지반

그림1. 지반조건에 따른 탄성 응답스펙트럼의 비교 (최대 지반가속도=0.12g)

지진에 대한 비선형 단자유도 구조물의 시간이력응답은 아래와 같은 운동방정식으로 부터 구해진다.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + F(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

여기에서, m , c 및 $F(t)$ 는 각각 질량, 감쇠상수 및 구조물의 복원력을 나타낸 것이며, $u(t)$ 는 상대 변위, $u_g(t)$ 는 지반의 변위, 그리고 이런 변수들 위에 있는 점들은 시간에 대한 미분차수를 의미한다.

구조물의 고유주기는 다음과 같이 주어진다.

$$T = 2\pi \left[\frac{m}{k} \right]^{1/2} = 2\pi \left[\frac{mu_y}{F_y} \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기에서, K 는 구조물의 초기 강성, F_y 는 구조물의 항복강도이다.

지진의 작용할 때 나타나는 구조물의 비탄성응답의 특성은 구조물의 수평항복강도가 감소함에

따라 비탄성변형이 증가하는 형태로 나타나게 되며, 그림2에서는 이를 도식적으로 보여주고 있다. 결과적으로 주어진 지진의 작용에 대해서 구조물의 최대 변위연성비 μ_i 보다 더 큰 연성비가 나타나지 않도록 제한해 줄 수 있는 최소 수평강도 $F_y(\mu=\mu_i)$ 를 결정하는 것이 중요한 일이다. 그림3에서 보여주고 있는 바와 같이 수평강도 $F_y(\mu=1)$ 와 $F_y(\mu=\mu_i)$ 를 구조물의 관성중량으로 무차원화한다면, 각각 탄성응답스펙트럼(linear elastic response spectrum) 및 특정 변위연성비에 대한 비탄성 응답스펙트럼으로 나타나게 된다.

주어진 지반운동에 대해서 $F_y(\mu=\mu_i)$ 를 구하는 일은 계산된 소요 변위연성비 μ 가 목표 변위연성비 μ_i 와 어느 정도의 허용오차 범위내로 수렴할 때까지 식(2)의 반복적인 계산을 필요로 하며, 주기와 목표 연성비를 각각 다르게 적용하면서 되풀이 하게 된다.

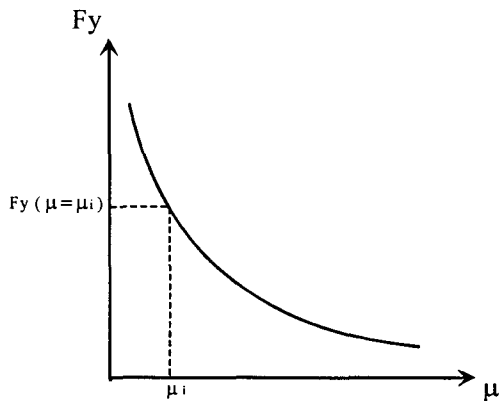


그림2. 변위연성비에 따른 구조물 항복강도의 변화

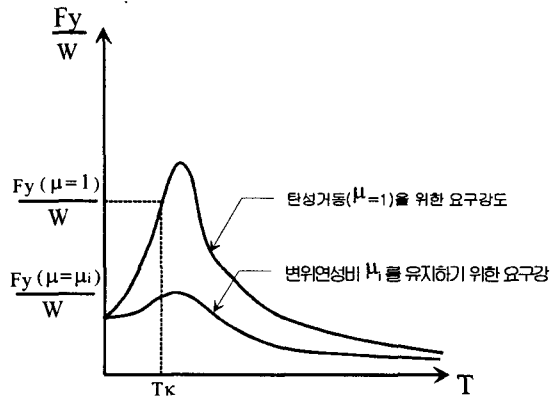


그림3. 탄성 및 비탄성 요구강도 스펙트럼

5. 비탄성 요구강도의 평가

5.1 비탄성 요구강도에 영향을 미치는 주요 변수

비탄성 요구강도는 구조물의 동적 특성뿐만 아니라 지반운동(즉, 지반가속도의 시간이력)에 의해서 결정된다. 주어진 지반운동에 대해서 비탄성 요구강도 $\frac{F_y}{W}$ 는 구조물의 진동주기, 감쇠, 이력거동의 형태와 비탄성 변형의 수준(즉, 변위연성비)에 대한 함수로 표현될 수 있다. 기존 연구 결과에 의하면 비탄성 요구강도는 구조물의 고유주기와 비탄성 변형의 수준에 따라 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{F_y}{W} = \frac{F_y}{W}(T, \mu_i) \quad (5)$$

F_y 에 대한 식(4)의 정의로부터 임의의 지반운동에 대해서 구조물이 탄성적으로 거동할 때(즉, $\mu_i=1$), 고유주기만을 고려하여 요구강도를 나타낸 것이 탄성설계강도 스펙트럼이다. 항복변위가 0에 가까운(즉, $\mu_s \rightarrow 0, T \rightarrow 0$) 강성이 큰 구조물(rigid system)은 수평항복강도를 조금만 감소시키더라도 큰 비탄성 변형을 초래한다. 결과적으로 임의의 지반운동에 대해서 이 구조물의 비탄성 요구강도는 탄성 요구강도와 동일하게 나타낼 수 있으며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{F_y}{W} = \frac{F_y}{W} (T \rightarrow 0, \mu_i) \rightarrow \frac{F_{elastic}}{W} \quad (6)$$

매우 유연한(flexible) 구조물(즉, $T \rightarrow \infty$)은 구조물의 수평강도와 관계없이 구조물의 최대 응답 변위가 지반의 최대변위와 유사하게 나타난다. 그러므로, 임의의 지반가속도-시간이력에 대해서 이러한 구조물의 비탄성 요구 강도는 탄성 요구강도를 변위연성비로 나눈 것과 동일하게 된다. 따라서, 이러한 구조물의 비탄성 요구강도는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{F_y}{W} = \frac{F_y}{W} (T \rightarrow \infty, \mu_i) \rightarrow \frac{F_{elastic}}{W \mu} \quad (7)$$

5.2 비탄성 요구강도에 대한 주기의 영향

현행 내진설계 규정은 비탄성 설계강도를 산정하기 위하여 반응수정계수로 알려져 있는 강도저감계수를 사용하고 있다. 이는 주기의 변화를 고려할 수 있도록 되어 있지 않고, 단지 구조 시스템의 형태를 고려하여 선택되고 있다. 1988년 NEHRP 규정(반응수정계수, R)과 1991년 UBC(시스템의 성능계수, R_w ; 항복강도를 허용응력설계법으로 적용하기 위하여 1.4배 정도 더 큰 강도저감계수를 사용함)는 모멘트연성 골조에 대하여 그림4와 같은 강도저감계수를 규정하고 있다. 그림4는 암반(S1)과 충적토(S2, S3) 지반에서 관측된 지진기록에 대하여 변위연성비가 2와 4인 구조물의 평균 강도저감계수를 보여주고 있으며, 상기 내진설계규정에서 정한 강도저감계수가 훨씬 더 큰 값을 나타내고 있다. 따라서, 이러한 내진설계규정으로 설계된 구조물들은 과도한 비탄성 변형(대부분의 구조물들은 시스템의 변위연성비가 4를 넘는 경우 국부 변위연성비는 매우 큰 값을 필요로 한다)을 방지하기 위하여 충분한 부가강도(overstrength)를 확보하여야 한다.

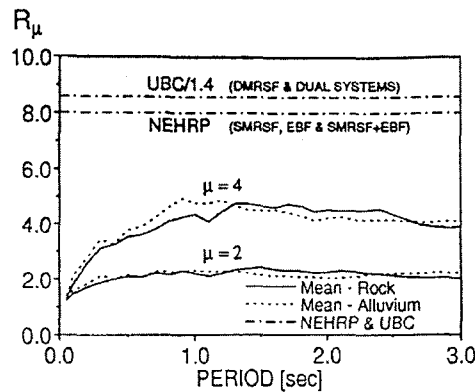


그림4. 비탄성 요구강도에 대한 주기의 영향

더우기, 그림4에서 나타나고 있는 바와 같이 상기 내진규정들은 고유주기의 변화에 대응하여 동일한 수준의 보호를 제공하지 않는다는 것을 알 수 있다.

한편, 지반조건의 영향에 따른 비탄성 요구강도를 보면 충적토 지반(S2, S3)에 위치한 구조물의 비탄성 요구강도는 암반지역에 위치한 구조물의 그것과 유사하게 나타나고 있다. 그러나, 연약지반(S4)에 대한 비탄성 요구강도는 암반이나 충적토 지반과는 다르게 나타나고 있으며, 특히 짧은 주기(지반의 탁월주기의 2/3 배 이하)의 구조물에 대한 비탄성 요구강도는 상대적으로 크게 나타나고 있다.

주어진 목표 변위연성비에 대한 강도저감계수는 지반운동에 따라 다양한 변화를 보여주고 있다.

이것은 구조물의 내진설계에서 주어진 목표한계보다 더 큰 변위연성비가 발생하지 않도록 하기 위하여 필요한 비탄성 요구강도는 지반운동에 따라 상당히 크게 변화한다는 사실을 의미한다. 즉, 평균 강도저감계수를 사용하는 것이 희망하는 수준의 안전율을 제공하지 못할 수도 있다는 사실을 의미한다. 이 경우에는 상황의 발생확률이 적도록 비탄성 요구강도(예를 들면, 평균+ σ 에 대응하는 비탄성 요구강도)를 설정하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

5.3 비탄성 요구강도에 대한 이력거동의 영향

비선형 단자유도 구조물의 이력거동은 5%의 감쇠를 갖는 탄소성(elasto-plastic) 모델을 기본형으로 설정하였으며, 이력거동의 변화에 따른 비탄성 요구강도를 평가하기 위하여 그림5와 같은 모델링을 선정하였다. 그림5에서 나타난 이력거동은 철근콘크리트 구조물의 거동특성을 반영하는데 적합하다고 할 수 있다.

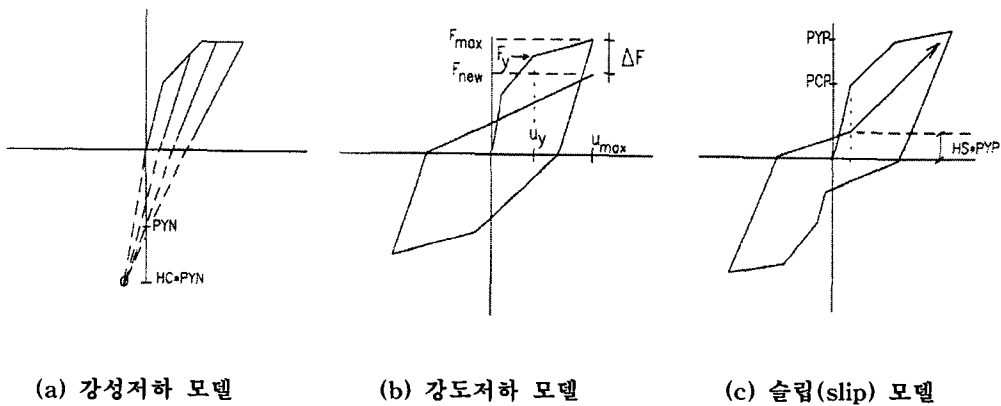


그림5. 구조물의 이력거동(hysteretic behavior)에 대한 모델링

이력거동의 특성에 따른 영향을 보면 핀칭(pinching)이나 강도저하 특성을 갖는 구조물의 비탄성 요구강도가 탄소성(elasto-plasto) 구조물의 그것보다 크게 나타나고 있으며, 변위연성비가 증가함에 따라 이러한 현상이 두드러지고 있다. 따라서, 안전측의 설계강도를 산정하기 위해서는 이력거동에 따른 특성을 적절히 고려해야 한다고 판단된다.

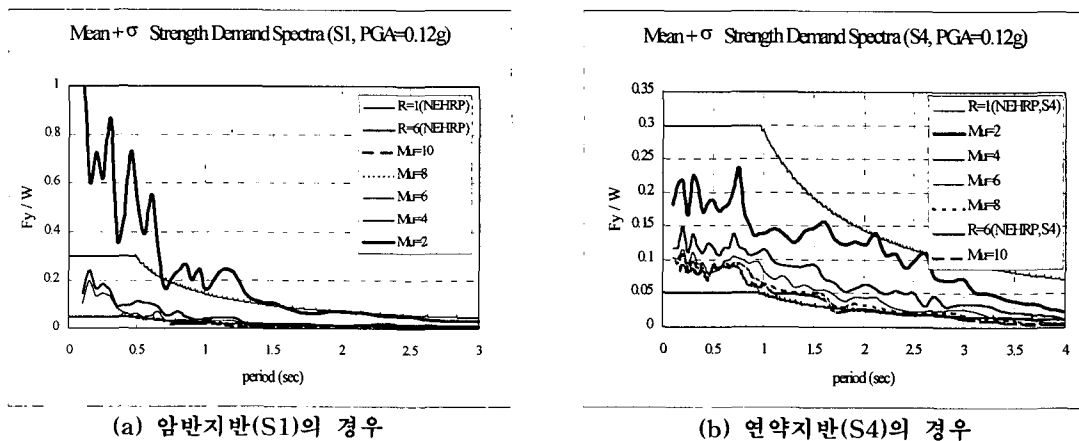


그림6. 비탄성 요구강도의 변화(탄소성 모델)

6. 결론

본 연구는 비탄성 변형의 수준을 제어하기 위한 비탄성 요구강도를 결정하는 데 있어서 주기, 목표 변위연성비 및 이력거동의 영향을 조사하는 것이며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 강진에 대하여 강한(rigid) 구조물을 제외하면 대부분 비선형 이력거동을 하도록 설계되는 것이 일반적이며, 이 경우 비탄성 요구강도(설계수평강도)는 탄성 요구강도 보다 감소한 값으로 결정된다. 탄성 요구강도로 부터 비탄성 요구강도로의 강도저감은 주로 변위연성능력, 구조물의 주기, 지반조건과 이력거동 특성에 의해서 달라진다.

2) 이력거동의 특성에 따른 영향을 보면 핀칭(pinching)이나 강도저하 특성을 갖는 구조물의 비탄성 요구강도는 탄소성(elasto-plasto) 구조물의 그것보다 크게 나타나고 있으므로 안전측의 설계강도를 산정하기 위해서는 이력거동에 따른 특성을 적절히 고려해야 한다고 판단된다.

3) 충적토 지반에 위치한 구조물의 비탄성 요구강도는 암반지역에 위치한 구조물의 그것과 유사하게 나타나고 있다. 그러나, 연약지반에 대한 비탄성 요구강도는 암반이나 충적토 지반과는 다르게 나타나고 있으며, 특히 짧은 주기(지반의 탁월주기의 2/3 배 이하)의 구조물에 대한 비탄성 요구강도는 상대적으로 크게 평가되어야 한다고 판단된다.

4) 비탄성 설계강도가 연성(ductility), 주기(period), 지반(site condition) 및 이력거동의 영향을 고려하여 적절하게 산정된다면, 구조 시스템과 부재간의 소요 연성능력의 상관관계를 규정할 수 있고 구조물의 부가강도를 추정할 수 있으므로 현행 내진설계 규정을 보다 더 합리적이고 명확한 방향으로 유도할 수 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 초대형구조시스템연구센터의 지원에 의한 것으로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 대한건축학회 (1987), 내진설계 지침서 작성에 관한 연구, 건설부
2. H. Krawinkler (1995), "New Trends in Seismic Design Methodology", Proceedings of Tenth European Conference on Earthquake Engineering, Duma, pp. 821-830.
3. Building Seismic Safety Council (1992), NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulation for New Buildings, Part 1 and 2, Provisions and Commentary, FEMA.
4. J. D. Osteraas and H. Krawinkler (1990), "Strength and Ductility Considerations in Seismic Design", John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report No. 90, Stanford University, California.
5. Christopher Rojahn (1988), "An Investigation of Structural Response Modification Factors", Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 5, Tokyo-Kyoto, Japan, pp. 1087-1092.